

УДК 621.3.01

doi:10.20998/2413-4295.2018.16.11

ПРО ВЗАЄМОДІЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ І ФЕРОМАГНІТНОГО СЕРЕДОВИЩА

I. В. ХОМЕНКО

кафедра «Передача електричної енергії», НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
email: igor.v.khomenko@gmail.com

АННОТАЦІЯ Досліджена взаємодія електромагнітного поля і феромагнітного середовища, показано, що магнітна проникність речовинного середовища є її питомою індуктивністю, встановлений функціональний зв'язок між питомою магнітною провідністю феромагнітного середовища і її магнітною проникністю. Впроваджене поняття електрорушійної сили магнітного зсуву. Природа взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища розкрита шляхом використання понять вільних і зв'язаних магнітних доменів. Розглянуто енергетичні процеси, що утворюються при взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища.

Ключові слова: електромагнітне поле; феромагнетик; індуктивність; магнітна проникність; електрорушійна сила магнітного зсуву; вільні і зв'язані магнітні домени.

ABOUT THE INTERACTION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD AND THE PERMAGNETIC ENVIRONMENT

I. KHOMENKO

Department "electricity transmission", NTU "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT The task of the actual work is to study the interaction of the electromagnetic field and the ferromagnetic medium, obtaining the main analytical dependencies describing these processes. Mathematical modeling is based on the equations of D.Maxwell. It is established that the magnetic permeability of the medium is its specific inductance, and the functional connection between the specific magnetic conductivity of the ferromagnetic medium and its magnetic permeability is established. Introduced concept of electromotive force of magnetic shift. The energy processes formed in the interaction of an electromagnetic field and a ferromagnetic medium are considered. Theoretical studies are based on the use of concepts of free and bound magnetic domains. The research complements our notions of inductance, which is one of the main technological and design parameters of electrical installations. It is implemented in devices or as a separate element - a coil of inductance (synchronous generator, transformer), or as a characteristic of a particular element (working inductance of power lines). The inductive characteristics of these devices significantly affect the modes in electrical networks and systems. Effective and reliable operation of projected electrical installations and devices can only be achieved if, in their development, the concept of inductance will be taken into account in full on the basis of the conducted research.

Keywords: electromagnetic field; ferromagnet; inductance; magnetic permeability; electromotive force of a magnetic shear; free and bound magnetic domains.

Вступ

Теоретична основа сучасної електроенергетики в узагальненому вигляді представлена рівняннями Максвелла і базується на процесах взаємодії електромагнітного поля і середовища. І як наслідок основні електротехнічні середовища поділяють на провідники, діелектрики і феромагнетики.

Індуктивність є одним з основних технологічних і конструктивних параметрів електроустановок, як і усіх електротехнічних пристроїв [1]. Вона реалізується в пристроях або як окремий елемент – котушка індуктивності (синхронний генератор, трансформатор), або як характеристика того або іншого елемента (робоча індуктивність ліній електропередачі). Індуктивні характеристики суттєво впливають на режими в електричних мережах та системах. Ефективне і

надійне функціонування проєктованих електроустановок та пристроїв можна досягти лише в тому випадку, якщо при їх розробці індуктивність буде враховуватися у повному обсязі.

З метою збільшення магнітного поля в котушках індуктивності використовують феромагнітні осереддя. Це обумовлено властивістю феромагнітних матеріалів намагнічуватися під впливом зовнішнього магнітного поля і як наслідок посилювати його. Феромагнітні середовища складаються з магнітних доменів. По відношенню до зовнішнього магнітного поля вони підрозділяються на вільні і зв'язані. Основною характеристикою магнітного домена є магнітний момент, який обумовлений молекулярними струмами феромагнітного середовища. В процесі намагнічування магнітні моменти зв'язаних магнітних доменів зорієнтовані за напрямком зовнішнього

магнітного поля, змінюються з ним синхронно і практично нерухомі відносно зовнішнього магнітного поля. Вільні домени змінюють напрямок своїх магнітних моментів за напрямком зовнішнього магнітного поля і стають зв'язаними, процес намагнічування завершується і феромагнітне середовище стає насиченим.

Завданням дійсної роботи є дослідження взаємодії магнітного поля і феромагнітного середовища і отримання основних аналітичних залежностей, що описують ці процеси. Ці дослідження доповнюють наші уявлення про фізичні процеси, що відбуваються в електроенергетичних установках і дозволять підвищити їх техніко-економічні характеристики, як в процесі експлуатації так і на етапі їх проектування.

Аналіз публікацій. Фундаментальні основи теорії електромагнітного поля були закладені експериментальними і теоретичними дослідженнями М. Фарадея і Д. Максвелла [2]. Вагомий внесок в сучасну електродинаміку внесли Л. Ландау і І. Тамм [3,4]. Класична теорія феромагнетизму розроблена у працях [5,6,7]. Сучасні дослідження вітчизняних і зарубіжних науковців [8,9,10,11] направлені на доповнення наших уявлень про фізичні процеси взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища, а також на вирішення актуальних практичних задач. Так у статті [12] розглянуті особливості магнітних властивостей і характеристик намагнічення листових електротехнічних сталей, у роботі [13] використовується поняття комплексної магнітної проникності для моделювання процесів в електричних машинах, а у публікації [14] проаналізований вплив температури на магнітні властивості феромагнітних середовищ. В праці [15] розглянутий фізико-математичний апарат для опису електромагнітних процесів в пристроях електроживлення на основі коливальних контурів.

Мета статті

Метою статті є дослідження взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища, встановлення зв'язку між магнітною проникністю речовинного середовища з її питомою індуктивністю і питомою магнітною провідністю, а також аналіз енергетичних процесів, що утворюються при взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища. Вирішення цих питань підвищить достовірність моделювання процесів в електроенергетичних пристроях принцип дії яких заснований на електромагнітних перетвореннях, що в свою чергу підвищить ефективність їх експлуатації.

Основна частина

Основні рівняння електромагнітного поля, постульовані Д. Максвеллом, повною мірою описують електромагнітні процеси всіх

електротехнічних пристроїв [2,16]. Зміст другого рівняння Максвелла полягає в тому, що всяка зміна магнітної індукції в часі викликає вихрове електричне поле

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}.$$

Величину $-\frac{d\mathbf{B}}{dt}$ Хевісайд називав струмом

магнітного зсуву. Цей струм відображає процеси в магнітних доменах феромагнітного середовища і зв'язаний зі зміною напрямків магнітних і спінових моментів. Зміна струму магнітного зсуву призводить до зміни відповідних магнітних потоків і появи електрорушійної сили (ЕРС) магнітного зсуву $\mathbf{e}_{\text{мзс}}$. Тому з енергетичної і фізичної точки зору для величини $-\frac{d\mathbf{B}}{dt}$ більш прийнятною є назва – ЕРС магнітного зсуву, або ЕРС зсуву.

Співвідношення між векторами індукції і напруженості магнітного поля, що враховує наявність магнітних доменів у феромагнітному середовищі, описується виразом:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{J}),$$

де \mathbf{H} – напруженість магнітного поля, \mathbf{J} – намагніченість феромагнітного середовища.

Таким чином, ЕРС магнітного зсуву $\mathbf{e}_{\text{мзс}}$ складається з двох складових:

$$\mathbf{e}_{\text{мзс}} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} = -\mu \left(\frac{d\mathbf{H}}{dt} + \frac{d\mathbf{J}}{dt} \right).$$

Складова $\frac{d\mathbf{H}}{dt}$ являє собою ЕРС магнітного

зсуву, що відбиває процеси в самому магнітному полі, у просторі між зарядженими частками речовини, що рухаються й усередині них. Складова $\frac{d\mathbf{J}}{dt}$,

обумовлена швидкістю зміни намагнічення феромагнетика, є додатковою ЕРС магнітного зсуву, що викликається зміною намагнічення феромагнетика в результаті зміни магнітного поля.

Для однорідного й ізотропного речовинного середовища [16]:

$$\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H},$$

тому

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \frac{d(\mu_a \mathbf{H})}{dt},$$

таким чином [17]

$$\text{rot} \mathbf{E} = \frac{d(\mu_a \mathbf{H})}{dt}.$$

Фізичний зміст ЕРС магнітного зсуву $\mathbf{e}_{\text{мзс}} = -\frac{d(\mu_a \mathbf{H})}{dt}$ показує, що вона виникає в будь-якому магнітному середовищі, у тому числі й у вакуумі, при зміні напруженості магнітного поля, або магнітної проникності речовини.

У відсутності зовнішнього магнітного поля елементарні магнітні домени, що входять в структуру не намагніченого магнітного матеріалу, розташовуються таким чином, що в будь-якому макроскопічному об'ємі даного речовинного середовища результуючий магнітний момент дорівнює нулю, і магнітні поля окремих часток взаємно компенсуються.

Для виникнення магнітної ЕРС необхідна наявність причини, що викликала б спрямований рух кордонів магнітних доменів або переорієнтацію їх магнітних моментів. Цією причиною може бути, наприклад, магнітне поле вакууму. При внесенні магнітного матеріалу (речовинного середовища) в магнітне поле вакууму вільні магнітні домени, що входять у структуру даного середовища, починають рухатися – виникає магнітна ЕРС. Ця ЕРС існує доти, поки магнітне поле в магнітному середовищі не досягне свого сталого, постійного значення. Ця ЕРС має дві складові: ЕРС магнітної провідності, що обумовлена вільними магнітними доменами, і ЕРС магнітного зсуву, що відбиває процеси в самому полі й викликається зміною напруженості магнітного поля. У результаті руху та переорієнтації магнітних доменів відбувається їхній перерозподіл у речовинному середовищі так, що на його поверхні і в його об'ємі утворюються поверхневі і об'ємні макроскопічні односпрямовані магнітні домени. Дані домени розташовуються так, що пов'язане з ними поле накладається на зовнішнє й викликає зростання результуючого поля у всіх елементах об'єму магнітного матеріалу [5,6]. Це обумовлено тим, що тіло магнітного матеріалу вноситься у вакуум, магнітна проникність якого менше магнітної проникності тіла, тому що в речовинному середовищі є, на відміну від вакууму, домени, що взаємодіють з зовнішнім магнітним полем. Напруженість \mathbf{H} результуючого поля магнітного матеріалу є геометричною сумою напруженості \mathbf{H}_0 зовнішнього поля й напруженості \mathbf{H}_1 поля доменів магнітного матеріалу. Значення напруженості \mathbf{H}_1 поля магнітних доменів речовинного середовища визначається кількістю елементарних одно направлених струмів або одно направлених магнітних моментів доменів, які перебувають в об'ємі магнітного матеріалу.

Всі магнітні речовинні середовища мають провідність не рівну нулю, тому на поверхні розподілу вакууму й феромагнетика існують поверхневі (об'ємні) струми як зв'язані щільністю δ_{sp} , так і вільні щільністю δ_s . Тангенційна складова вектора магнітної індукції на границі розподілу перетерплює розрив, змінюється стрибком на величину поверхневої щільності вільних струмів δ_s [18]:

$$\delta_s = B_t - B_{t0} = \mu_0(\mu_r H - H_{t0}), \quad (1)$$

де μ_r – відносна магнітна проникність речовини.

Тому що для однорідних і ізотропних речовинних середовищ:

$$\mu_a H_t - \mu_0 H_{t0} = \delta_s,$$

то:

$$\mu_a = \frac{\delta_s + \mu_0 H_{t0}}{H_t},$$

або:

$$\mu_a = \frac{\delta_s}{H_t} + \frac{\mu_0 H_{t0}}{H_t}, \quad (2)$$

де B і H_t – тангенційні складові відповідно вектора \mathbf{B} магнітної індукції й вектора \mathbf{H} напруженості магнітного поля феромагнетика; B_{t0} і H_{t0} – тангенційні складові відповідно вектора \mathbf{B}_0 магнітної індукції й вектора \mathbf{H}_0 напруженості магнітного поля вакууму.

Таким чином, абсолютна магнітна проникність μ_a феромагнітного середовища залежить від щільності δ_s вільних струмів (магнітних моментів) на його поверхні (або в об'ємі). Поверхневий струм формується при внесенні феромагнетика в магнітне поле вакууму за рахунок переміщення вільних струмів під дією магнітного поля вакууму. При цьому змінюється, за рахунок зміни поверхневої щільності δ_s , і абсолютна магнітна проникність μ_a речовинного середовища. Таким чином, протягом усього перехідного процесу, обумовленого внесенням речовинного середовища в магнітне поле вакууму, абсолютна магнітна проникність μ_a феромагнетика є функцією часу доти, поки магнітне поле в феромагнетик не досягне свого сталого, постійного значення. Отже, щільності ЕРС (потокозчеплення), що викликається зміною поверхневого (об'ємного) струму феромагнетика при його внесенні у вакуум, відповідає наступний вираз:

$$\mathbf{e} = \frac{d\delta_s}{dt} = \frac{d}{dt}(\mu_a \mathbf{H} - \mu_0 \mathbf{H}_0). \quad (3)$$

В той же час, з огляду на те, що магнітна постійна $(\mu_0 \cong 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} = \text{const})$ не залежить від часу, і незмінною у часі залишається так само й напруженість \mathbf{H}_0 магнітного поля вакууму, то:

$$\mathbf{e} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt} + \mathbf{H} \frac{d\mu_a}{dt}. \quad (4)$$

Перша складова даної ЕРС $\mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt}$ є ЕРС

магнітного зсуву. Її друга складова $\mathbf{H} \frac{d\mu_a}{dt}$ – ЕРС,

обумовлена зміною поверхневої щільності вільних струмів, тобто впорядкованим рухом вільних заряджених часток (або їх магнітних моментів) при внесенні феромагнетика в магнітне поле вакууму, таким чином, ЕРС магнітної провідності:

$$\mathbf{e}_{\text{пр}} = \mathbf{H} \frac{d\mu_a}{dt}. \quad (5)$$

Тому що відповідно до закону Ома в диференціальній формі для провідного середовища струм провідності визначається виразом $\delta_{\text{пр}} = \gamma \mathbf{E}$, то:

$$\gamma = \frac{d\mu_a}{dt}. \quad (6)$$

Отримана аналітична залежність (6) описує зв'язок між магнітною проникністю й питомою магнітною провідністю будь-якого реального речовинного середовища.

Таким чином, при внесенні речовинного середовища, у якому відсутні феромагнетики, що намагнічуються, в магнітне поле вакууму другому рівнянню Максвелла в диференціальній формі відповідає вираз:

$$\text{rot} \mathbf{E} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt}$$

де $\mathbf{e}_{\text{зс}} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt}$ – ЕРС магнітного зсуву, що відбиває процеси в самому полі, у просторі між атомами магнітної речовини й усередині них.

При наявності в речовинному середовищі феромагнетиків, що намагнічуються, поверхнева щільність зв'язаних струмів (магнітних моментів) δ_{sp}

на поверхні розподілу вакууму й феромагнітного середовища, тобто на поверхні розриву вектора \mathbf{J} , намагніченості, визначається поверхневою дивергенцією даного вектора [18]:

$$\delta_{\text{sp}} = -\text{Div} \mathbf{J} = -(\mathbf{J} - \mathbf{J}_0) \mathbf{t}_0 = -J_t = \mu_0 (0 - k H_t),$$

де \mathbf{J}_0 і \mathbf{J} – вектори намагніченості із двох сторін від поверхні розриву, причому, $\mathbf{J}_0 = 0$, тому що у вакуумі відсутні вільні магнітні моменти; $k = \mu_r - 1$ – магнітна сприйнятливості феромагнетика; \mathbf{t}_0 – тангенційна складова нульового вектору.

Таким чином:

$$\delta_{\text{sp}} = J_{t0} - J_t = -\mu_0 (\mu_r - 1) H_t = \mu_0 H_t - \mu_a H_t \quad (7)$$

Вираз, що відповідає повній щільності поверхневого струму, може бути знайдений за допомогою складання формул (1) і (7):

$$\delta_s + \delta_{\text{sp}} = \mu_0 (H_t - H_{t0}). \quad (8)$$

Отримана формула відповідає загальному принципу лоренцівській теорії магнітного поля в феромагнетиках: якщо враховувати як вільні, так і зв'язані струми, то всі закони поля можна виражати через вектори напруженості, не звертаючись до векторів магнітної індукції й ігноруючи «проникність» середовища [18].

Таким чином, тангенційна складова напруженості H_{ti} магнітного поля, створюваного вільними й зв'язаними струмами речовинного середовища, може бути визначена виразом:

$$H_{ti} = H_t - H_{t0} = \frac{\delta_s + \delta_{\text{sp}}}{\mu_0}. \quad (9)$$

З огляду на те, що в розглянутому випадку:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_t, \text{ а } \mathbf{H}_0 = \mathbf{H}_{t0},$$

а так само й на те, що в лінійних речовинних середовищах вектор напруженості результуючого магнітного поля відповідно до принципу суперпозиції дорівнює геометричній сумі векторів напруженостей магнітного поля, створюваного струмами речовинного середовища, і поля вакууму, тобто:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_i + \mathbf{H}_0,$$

тому:

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{H} - \mathbf{H}_0. \quad (10)$$

Тому що вільні струми (магнітні моменти) зміщуються в напрямку зовнішнього поля, а зв'язані – практично нерухомі, і лінії магнітного поля підходять тангенційно до поверхні розподілу вакууму й ферромагнетика, то вектори \mathbf{H}_i й \mathbf{H}_0 мають однакові напрямки. Таким чином, модуль вектора \mathbf{H} напруженості результуючого поля в ферромагнітному середовищі дорівнює добутку модулів векторів H_0 і H_i , тобто:

$$|H| = |H_0| - |H_i|,$$

тому:

$$H_t - H_{t0} = -(|H_0| - |H_i|) = \frac{\delta_s + \delta_{sp}}{\mu_0}. \quad (11)$$

Тому що величина :

$$H_{ts} = \frac{\delta_s}{\mu_0} = \frac{\mu_0(\mu_r H_t - H_{t0})}{\mu_0} = \mu_r H_t - H_{t0}$$

є тангенційною складовою напруженості магнітного поля, створюваного вільними струмами (магнітними моментами), а величина:

$$H_{tsp} = \frac{\delta_{sp}}{\mu_0} = \frac{\mu_0(H_t - \mu_r H_t)}{\mu_0} = H_t - \mu_r H_t$$

– тангенційною складовою напруженості магнітного поля, створюваного зв'язаними струмами (магнітними моментами), то:

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{H}_s + \mathbf{H}_{sp}. \quad (12)$$

У правій частині другого рівняння Максвелла ($\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{e}_{np} + \mathbf{e}_{zc}$) до складу ЕРС зсуву $\mathbf{e}_{мс}$ в цьому

випадку входить додаткова ЕРС зсуву $\left(\frac{d\mathbf{J}}{dt}\right)$, що викликається зміною намагніченості речовини в результаті зміни магнітного поля.

Щоб розглянути енергетичні процеси, що протікають у речовинному ферромагнітному середовищі при зміні напруженості магнітного поля, наприклад, у момент його внесення в магнітне поле вакууму, треба виділити в даному середовищі елементарний об'єм ($dV = dS \cdot dl$).

У процесі створення магнітного поля в цьому об'ємі від джерела магнітної енергії буде взята енергія. У силу малості об'єму можна вважати, що напруженість \mathbf{H} магнітного поля і її зміна $\frac{d\mathbf{H}}{dt}$ ті самі в повному об'ємі. Робота, затрачувана силами поля на

переміщення одиничного струму на відстань dl , що дорівнює довжині елементарного об'єму, визначається як [16]:

$$A = \mathbf{H} d\mathbf{l} \quad (i = A = \int \mathbf{H} d\mathbf{l}).$$

Тому що струм i , що проходить через поперечний переріз даного об'єму, у процесі внесення ферромагнетика в магнітне поле вакууму може бути знайдений по формулі:

$$di = \delta dS,$$

то при переміщенні цього струму або потокозчеплення уздовж елементарного об'єму магнітне поле здійснює роботу, якій відповідає вираз:

$$dA = \delta dS H d\mathbf{l} = \delta \mathbf{H} dV. \quad (13)$$

Таким чином, енергія, що виділяється в елементарному об'ємі в одиницю часу, визначається як:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{d(\delta H)}{dt} dV = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{H} dV, \quad (14)$$

де $\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{d\delta}{dt}$ – щільність повної ЕРС, обумовленої зміною магнітного поля речовинного середовища.

Причому: $\delta = \delta_s + \delta_{ps}$, тому: $\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{d\delta}{dt} = \boldsymbol{\varepsilon}_{мп} + \boldsymbol{\varepsilon}_{мс}$.

Крім того: $\mathbf{e}_{мп} = \gamma \mathbf{H}$ і $\mathbf{e}_{мс} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt}$, таким чином:

$$\frac{dW_{ем}}{dt} = \gamma \mathbf{E} dV + \mu_a \mathbf{H} \frac{d\mathbf{H}}{dt} dV = \gamma E^2 dV + \frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV \quad (15)$$

Але $\gamma E^2 dV$ – енергія, що виділяється у вигляді теплоти в елементарному об'ємі dV в одиницю часу, а $\frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV$ швидкість зміни запасу енергії в магнітному полі даного обсягу [16].

Отже, питома енергія, що запасється в магнітному полі речовинного середовища:

$$W_{\text{маг}} = \frac{\mu_a H^2}{2} = \frac{\mathbf{B} \mathbf{H}}{2}. \quad (16)$$

Пристроєм, у якому концентрується магнітна енергія є котушка індуктивності. Основною його характеристикою є індуктивність. Під індуктивністю

розуміють абсолютну величину відносини потокозчеплення до струму, що протікає по котушці і створює це потокозчеплення [19].

На границі розділу середовища й феромагнетика при відсутності ЕРС на поверхні середовища виконується умова: модуль вектора магнітної індукції \mathbf{B} в будь-якій точці феромагнетика, безпосередньо пов'язаною з поверхнею середовища, чисельно дорівнює щільності струму δ на поверхні середовища в даній точці, тобто: $\mathbf{B} = \delta$.

Для однорідного ізотропного феромагнітного середовища: $\mathbf{B}_i = \mu_a \mathbf{H}$, Тому потокозчеплення $d\Psi$ на елементарній поверхні dS ($dq = \sigma dS$) феромагнітного тіла визначається виразом:

$$d\Psi = \mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S}.$$

Струмом через елементарні поверхні dS провідних і феромагнітних тіл, обумовленим зарядами, що перебувають на них, прийнято розуміти роботу, затрачувану силами поля при переносі одиничного струму з однієї частини середовища на іншу:

$$di = \mathbf{H} d\mathbf{l}.$$

Таким чином, індуктивність dL системи провідних і феромагнітних середовищ із проникністю μ_a , визначається як:

$$dL = \frac{d\Psi}{di} = \frac{\mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S}}{\mathbf{H} d\mathbf{l}},$$

тобто:

$$dL = \frac{\mu_a dS}{dl}.$$

У тому випадку, якщо площі провідних поверхонь dS і відстані dl між ними є одиничними, то:

$$dL = \mu_a. \quad (17)$$

Таким чином, абсолютна магнітна проникність μ_a речовини є питомою індуктивністю.

Тому що, $\mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S} = d\Psi_{\text{елл}}$ – потік вектора електромагнітної індукції через поперечний переріз dS елементарного об'єму речовинного середовища із проникністю μ_a , тому електрична індуктивність суть коефіцієнт пропорційності між потоком вектора

магнітної індукції й струмом, що створює даний потік:

$$L = \frac{\int \mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S}}{\oint \mathbf{H} d\mathbf{l}} = \frac{\Psi_{\text{елл}}}{I}. \quad (18)$$

Швидкість надходження енергії в елементарний об'єм речовинного магнітного середовища при його внесенні в магнітне поле вакууму характеризується миттєвою потужністю p [4]:

$$p = \frac{dW_{\text{ел}}}{dt} dV = \mu_a \mathbf{H} \frac{d\mathbf{H}}{dt} d\mathbf{S} = \mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S} \frac{d\mathbf{H} d\mathbf{l}}{dt}.$$

Або:

$$p = \mathbf{H} d\mathbf{l} \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt} d\mathbf{S} = i \mathbf{e}_{\text{МЗС}}, \quad (19)$$

де $i = \mathbf{H} d\mathbf{l}$ – миттєве значення струму, що протікає через елементарний об'єм,

$\mathbf{e}_{\text{МЗС}} = \mu_a \frac{d\mathbf{H}}{dt} d\mathbf{S} = \varepsilon_{\text{МЗС}} d\mathbf{S}$ – миттєве значення ЕРС

магнітного зсуву, що створюється в елементарному об'ємі.

Отже, під миттєвою потужністю слід розуміти добуток миттєвого значення струму i в елементарному об'ємі речовинного середовища, на миттєве значення ЕРС магнітного зсуву $\mathbf{e}_{\text{МЗС}}$, що створюється в даному об'ємі:

$$p = i \mathbf{e}_{\text{МЗС}}.$$

Таким чином:

$$\mathbf{e}_{\text{МЗС}} = \frac{p}{i} = \frac{\mu_a \mathbf{H} d\mathbf{S}}{\mathbf{H} d\mathbf{l}} \frac{d\mathbf{H} d\mathbf{l}}{dt}, \quad (20)$$

тому:

$$\mathbf{e}_{\text{МЗС}} = L \frac{di}{dt}. \quad (21)$$

Висновки

Таким чином, досліджена взаємодія електромагнітного поля і феромагнітного середовища, шляхом використання понять вільних і зв'язаних магнітних доменів.

Встановлено що магнітна проникність речовинного середовища є її питомою індуктивністю, встановлений функціональний зв'язок між питомою магнітною провідністю феромагнітного середовища і її магнітною проникністю. Впроваджене поняття

електрорушійної сили магнітного зсуву. Розглянуто енергетичні процеси, що утворюються при взаємодії електромагнітного поля і феромагнітного середовища. Проведені дослідження доповнюють наші уявлення про фізичні процеси, що відбуваються в електроенергетичних установках і дозволять підвищити їх техніко-економічні характеристики, як в процесі експлуатації так і на етапі їх проектування.

Список літератури

1. Федоров, Н. Н. Основы электродинамики / Н. Н. Федоров. – М.: Вища школа, 1965. 328 с.
2. Максвелл, Дж. К. Трактат об электричестве и магнетизме. В двух томах / Дж. К. Максвелл. – М.: Наука, 1989.
3. Ландау, Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982.
4. Тамм, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.
5. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества / С. Тикадзуми. – М.: Мир, 1983.
6. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение / С. Тикадзуми. – М.: Мир, 1987.
7. Вонсовский, С. В. Магнетизм: Учебное пособие / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1984. – 208 с.
8. Zong, B. Y. Tailoring Diverse Microwave Properties of High Magnetic Moment FeCo Nanofilms through Different Atom Arrangements / B. Y. Zong, N. N. Phuoc, Y. P. Wu, P. Ho, et al. // *ChemElectrochem*. – 2015. – 2, 11. – 1760-1767. – doi: 10.1002/celec.201500230.
9. Al'Azzavi, H. S. M. Влияние окисленных прослоек на магнитные свойства многослойных пленок на основе нанокompозитов аморфный ферромагнетик-диэлектрик / H. S. M. Al'Azzavi, A. B. Грановский, Ю. Е. Калинин, В. А. Макагонов, и др. // *ФТТ*. – 2016. – 58, 5. – 910-916.
10. Geng, H. [Fe₈₀Ni₂₀-O/SiO₂]_n Multilayer thin films for applications in GHz range / H. Geng, J. Q. Wei, S. J. Nie, Y. Wang, et al. // *Mater. Lett.* – 2013. – 92. – 346-349. – doi: 10.1016/j.matlet.2012.11.015.
11. Chen, J. H. High frequency characteristics of NiO/(FeCo/NiO)₁₀ multilayers with exchange anisotropy / J. H. Chen, D. M. Tang, Y. W. Li, B. S. Zhang, et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2010. – 322, 20. – 3109-3111. – doi: 10.1016/j.jmmm.2010.05.039.
12. Рожненко, Ж. Г. Особенности магнитных свойств и характеристик намагничивания листовых электротехнических сталей / Ж. Г. Рожненко, С. Т. Толмачев // *Электротехника и Электромеханика*. – 2010. №2. – С. 37-41.
13. Бравичев, С. Н. Применение понятия комплексной магнитной проницаемости при расчетах магнитных полей электрических машин / С. Н. Бравичев, В. В. Быковский // *Вестник ОГУ*. – 2004. – №2. – С. 190-193.
14. Себко, В. В. Воздействие температуры на магнитную проницаемость и удельное электрическое сопротивление цилиндрического изделия / В. В. Себко // *Электротехника и электромеханика*. – 2003. – №3. – С. 44-47.
15. Гейзер, А. А. Физико-математический аппарат для описания электромагнитных процессов в устройствах электропитания на основе колебательных контуров / А.

А. Гейзер // *Вестник Приазов. Гос. Техн. Ун-та*. – 1995. – № 1. – С. 284-287.

16. Бессонов, Л. А. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле / Л. А. Бессонов. – М.: Вища школа, 1986. – 263 с.
17. Сукачев, А. П. Теоретичні основи електротехніки. Частина II. Фізичні основи електротехніки / А. П. Сукачев. – Харків, 1959. – 460 с.
18. Поливанов, К. М. Теоретичні основи електротехніки, ч. 3, Теорія електромагнітного поля / К. М. Поливанов. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
19. Шимони, К. Теоретична електротехніка / К. Шимони. – М.: Мир, 1964. – 773 с.

Bibliography (transliterated)

1. Fedorov, N. N. Osnovi elektrodinamiki [Fundamentals of Electrodynamics]. Moscow: Vishha shkola, 1965, 328.
2. Maksvell, D. K. Traktat ob jelektrichestve i magnetizme. V dvuh tomah. [Treatise in electrical and magnetism. In a two parts]. Moscow: Nauka, 1989.
3. Landau, L. D., Lifshic, E. M. Jeletrodinamika sploshnyh sred [Electrodynamics of Continuous Media]. Moscow: Nauka, 1982.
4. Tamm, I. E. Osnovy teorii jelektrichestva [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 616.
5. Tikadzumi, S. Fizika ferromagnetizma. Magnitnye svojstva veshhestva [Physics of ferromagnetism. Magnetic properties of matter]. Moscow: Mir, 1983.
6. Tikadzumi, S. Fizika ferromagnetizma. Magnitnye harakteristiki i prakticheskoe primenenie [Physics of ferromagnetism. Magnetic characteristics and practical application]. Moscow: Mir, 1987.
7. Vonsovskij, S. V. Magnetizm: Uchebnoe posobie [Magnetism: A Tutorial]. Moscow: Nauka, 1984, 208.
8. Zong, B. Y., Phuoc, N. N., Wu, Y. P., et al. Tailoring Diverse Microwave Properties of High Magnetic Moment FeCo Nanofilms through Different Atom Arrangements. *ChemElectroChem*, 2015, 2, 1760-1767, doi:10.1002/celec.201500230.
9. Al'Azzavi, H. S., Granovskij, A. B., Kalinin, Ju. E., et al. Vlijanie oksislennyh prosloek na magnitnye svojstva mnogoslujnyh plenok na osnove nanokompозитов amorfnyj ferromagnetik-dielektrik [The effect of oxidized interlayers on the magnetic properties of multilayer films based on amorphous ferromagnet-dielectric nanocomposites]. *Fizika tverdogo tela*, 2016, 5, 910-916.
10. Geng, H., Wei, J. Q., Nie, S. J., et al. [Fe₈₀Ni₂₀-O/SiO₂]_n Multilayer thin films for applications in GHz range. *Materials Letters*, 2013, 92, 346-349, doi:10.1016/j.matlet.2012.11.015.
11. Chen, J. H., Tang, D. M., Li, Y. W., et al. High frequency characteristics of NiO/(FeCo/NiO)₁₀ multilayers with exchange anisotropy. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2010, 322, 3109-3111, doi:10.1016/j.jmmm.2010.05.039.
12. Rozhnenko, Zh. G., Tolmachov, S. T. Osobennosti magnitnyh svojstv i harakteristik namagnichivaniya listovyh jelektrotehnicheskikh stalej [Features of magnetic properties and magnetization characteristics of electrical grade sheet]. *Elektrotehnika i Elektromehaniка*, 2010, 2, 37-41.
13. Bravichev, S. N., Bykovskij, V. V. Osobennosti magnitnyh svojstv i harakteristik namagnichivaniya listovyh jelektrotehnicheskikh stalej [Features of magnetic properties

- and characteristics of magnetization of sheet electrotechnical steels]. *Vestnik OGU*, 2004, **2**, 190–193.
14. **Sebko, V. V.** Vozdejstvie temperatury na magnitnuju pronicaemost' i udel'noe jelektricheskoe soprotivlenie cilindricheskogo izdelija [The effect of temperature on the magnetic permeability and the specific electrical resistance of a cylindrical article]. *Elektrotehnika i Elektromehnika*, 2003, **3**, 44–47.
15. **Gejzer, A. A.** Fiziko-matematicheskij apparat dlja opisanija jelektromagnitnyh processov v ustrojstvah jelektropitanija na osnove kolebatel'nyh konturov [Physico-mathematical apparatus for describing electromagnetic processes in power supply devices based on oscillatory circuits]. *Vestnik Priazov. Gos. Tehn. Un-ty*, 1995, **1**, 284–287.
16. **Bessonov, L. A.** Teoretichni osnovi elektrotehniki. Elektromagnitne pole [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field]. Moscow: Vishha shkola, 1986, 263.
17. **Sukachev, A. P.** Teoretichni osnovi elektrotehniki. Chastina J. Fizichni osnovi elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering. Part J. Physical basis of electrical engineering]. Kharkiv, 1959, 460.
18. **Polivanov, K. M.** Teoretichni osnovi elektrotehniki. Teorija elektromagnitnogo polja [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field theory]. Moscow: Energija, 1969, 352.
19. **Shimoni, K.** Teoretichna elektrotehnika [Theoretical electrical engineering]. Moscow: Mir, 1964, 773.

Сведения об авторах (About authors)

Хоменко Игорь Васильович – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Передача електричної енергії», НТУ «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Igor Khomenko – candidate of technical sciences, associate professor, Department "electricity transmission", NTU "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE; e-mail: igor.v.khomenko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Хоменко, І. В. Про взаємодію електромагнітного поля і ферромагнітного середовища / **І. В. Хоменко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 16 (1292). – С. 76–83. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.11.

Please cite this article as:

Khomenko, I. About the interaction of the electromagnetic field and the permagnetic environment. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **16** (1292), 76–83, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Хоменко, И. В. Про взаимодействие электромагнитного поля и ферромагнитной среды / **И. В. Хоменко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 76–83. – doi:10.20998/2413-4295.2018.16.11.

АННОТАЦІЯ Исследовано взаимодействие электромагнитного поля и ферромагнитной среды, показано, что магнитная проницаемость вещественной среды является ее удельной индуктивностью, установлена функциональная связь между удельной магнитной проводимостью ферромагнитной среды и ее магнитной проницаемостью. Введено понятие электродвижущей силы магнитного смещения. Природа взаимодействия электромагнитного поля и ферромагнитной среды раскрыта путем использования понятий свободных и связанных магнитных доменов. Рассмотрены энергетические процессы, которые образуются при взаимодействии электромагнитного поля и ферромагнитной среды.

Ключевые слова: электромагнитное поле; ферромагнетик; индуктивность; магнитная проницаемость; электродвижущая сила магнитного смещения; свободные и связанные магнитные домены.

Поступила (received) 05.05.2018